

Les tôles fortes pour les ouvrages d'art *

R. Hubo, G. Garrigues, F. Schröter,
J. Flahaut (Dillinger Hütte GTS)

Les progrès réalisés dans la construction des ponts et des ouvrages d'art proviennent, en partie, de la disponibilité d'aciers améliorés. De plus, les tôles fortes, qui peuvent être livrées aujourd'hui dans une large gamme de dimensions et de nuances, permettent aux constructeurs de ponts la réalisation de constructions économiques tout en diminuant les coûts et les temps de fabrication, et en respectant les impératifs architecturaux comme l'esthétique et l'élégance d'un ouvrage d'art. Différents exemples seront présentés démontrant les possibilités impressionnantes des aciers modernes.

■ INTRODUCTION

Les paragraphes qui suivent présentent les nuances et dimensions de tôles fortes susceptibles d'être utilisées pour la construction de ponts métalliques. Viennent ensuite quelques exemples d'application en Europe puis en résumé le défi, aussi bien pour les sidérurgistes que pour les constructeurs de ponts, d'une utilisation accrue et plus efficace des tôles fortes dans la construction des ponts.

■ NUANCES DE TÔLES FORTES POUR PONTS MÉTALLIQUES

A ce jour, les aciers de construction classiques non alliés en nuances S235 et S355 sont les produits les plus souvent utilisés dans la construction métallique et c'est le S355 qui est particulièrement utilisé dans la construction des ponts. Dans de nombreux pays, la nuance intermédiaire S275 est également largement employée.

Autrefois, on utilisait surtout les nuances normalisées selon la norme EN 10113-2, qui peuvent être fournies jusqu'au niveau S460. Au milieu des années 60, commença le développement des nuances trempées et revenues. Ces produits peuvent aujourd'hui être fournis avec une limite d'élasticité minimale jusqu'à 1100 N/mm², mais les nuances à limite d'élasticité élevée S890Q, S965Q et S1100Q ne sont utilisées qu'en construction mécanique, par exemple pour les grues mobiles. Dans la construction métallique, seuls les aciers avec une limite d'élasticité jusqu'à 690 N/mm² sont utilisés. Ceci est dû à des raisons techniques – la soudabilité des nuances plus élevées peut être difficile – et à des restrictions administratives dans de nombreux pays européens.

Les années 80 virent le développement des aciers avec laminage thermomécanique. En dépit de propriétés identiques à celles des nuances normalisées (telles la limite d'élasticité et la résistance à la rupture fragile), ces produits offrent de nombreux avantages pour l'utilisation dans la construction métallique.

Ces différents aciers sont représentés sur la *figure 1*. Les aciers thermomécaniques atteignent les mêmes limites d'élasticité que les nuances normalisées, mais la teneur en éléments d'alliage est fortement réduite (*fig. 2*). Ceci conduit à un bas carbone équivalent, critère utilisé pour caractériser la soudabilité d'un matériau. Dans le cas de l'utilisation d'aciers thermomécaniques, cela conduit à une meilleure soudabilité, avec moins de préchauffage ou même pas de préchauffage, de meilleures caractéristiques dans la zone affectée par la chaleur, etc.

* Ce texte a fait l'objet d'une présentation aux Journées Sidérurgiques Internationales 2000 de l'ATS (Paris, 13-14 décembre, Session 2).

© La Revue de Métallurgie 2001.

Heavy plates for bridge construction

R. Hubo, G. Garrigues, F. Schröter,
J. Flahaut (Dillinger Hütte GTS)

Modern high strength steels enable bridge manufacturers to achieve efficient construction while taking into account architectural requirements on aesthetics and elegance. This is the case for heavy plates, which are today available in a wide range of dimensions and steel grades.

Steel grades

The general-purpose structural steels according to EN 10025 with minimum yield strength from 235 MPa up to 355 MPa are still the most popular grades used by bridge designers. Due to the necessity to reduce the dead weight of the construction and to use a "slim" design approach, higher strength plates have to be used: fine grain normalized (or normalizing rolled) steel according to EN 10113-2 with grades up to S460N/NL and quenched and tempered grades according to EN10137-2 up to S960QL.

However, developing new grades for use in steel construction does not amount only to raising the yield strength and impact toughness. Actually it is of the utmost importance to ensure good weldability for the material in order to achieve time and cost savings in the fabrication process.

At the beginning of the eighties, these aspects led to the development of the modern generation of thermomechanically rolled heavy plates (TMCP : ThermoMechanical Controlled Process or simply TM) which today can be supplied according to EN 10113-3. This sophisticated rolling process includes rolling stages at predetermined temperatures, interrupted by cooling periods, followed (after rolling) by air or water cooling (on-line accelerated cooling). This process in combination with the use of micro-alloying elements such as niobium allows the minimization of carbon (and other alloying elements) levels in comparison with the corresponding normalized grades. Consequently, excellent toughness values are ensured for the TM-rolled plates after welding. Therefore, preheating can be avoided or at least reduced in most cases. This also saves manufacturing costs and time.

Plate dimensions

As far as the dimensions are concerned, plates with a thickness up to 250 mm (or more), a width up to 4 300 mm (5 200 mm in special cases) and a maximum length of 36 000 mm are available today and they enable a construction process minimizing the number of welded joints. This not only reduces the manufacturing costs but also increases the structural safety and the fatigue strength of the works and facilitates the monitoring of the building phase.

Moreover, plates with varying thickness along the length can be produced by a sophisticated on-line control of the

roll gap. By using these longitudinally profiled plates (LP-Plates), bridge designers are able to individually adapt the bridge girders to the actual stress levels without requiring a large number of welds. Furthermore, this reduces the total amount of steel used in the construction. This slim design ensures competitive and reliable structures.

Bridge construction

During the past decade, more and more heavy plates have been used in bridge construction, particularly due to the advances in composite bridges consisting of a steel supporting structure with a concrete deck. A great variety of structures such as multi-girder, closed box girder or open box girder exists. This composite approach offers significant advantages especially in the field of medium span bridges (span between 30 and 150 m). By using high-strength heavy plates the cross-section of the girder construction can be downsized. This enables a slim and elegant design by simultaneously reducing the fabrication and assembly costs and time owing to the minimized number of welds and lower transportation costs.

Due to their construction technique, bridges with a large span (more than 150 m) constitute the bulk of steel structures. In many well-known projects high-strength heavy plates have been applied, for instance : the Normandy Bridge (France), the Erasmus Bridge in Rotterdam or the well known Øresund Viaduct.

In addition to the reasons discussed above, the design of larger spans is made possible by the higher stress resistance and the possibility of reducing the dead weight by minimizing the cross sections.

Outlook

It can already be said that the nearly unlimited range of dimensions and steel grades in which heavy plates can be delivered facilitates an optimized design of bridges which also takes into account economic and aesthetic aspects.

Furthermore, with steadily improving metallurgical and rolling techniques even more advanced plates will be available in the near future. Meeting the new demands for homogeneity of the mechanical and chemical characteristics, flatness and dimensional tolerances represents the most important challenge for the plate producers.

In addition it is of the utmost importance that steel producers support actively the bridge designers who are very willing to use these modern plates. The close collaboration between designers and steelmakers shall lead to an increase in the use of modern steel plates in European bridgebuilding.

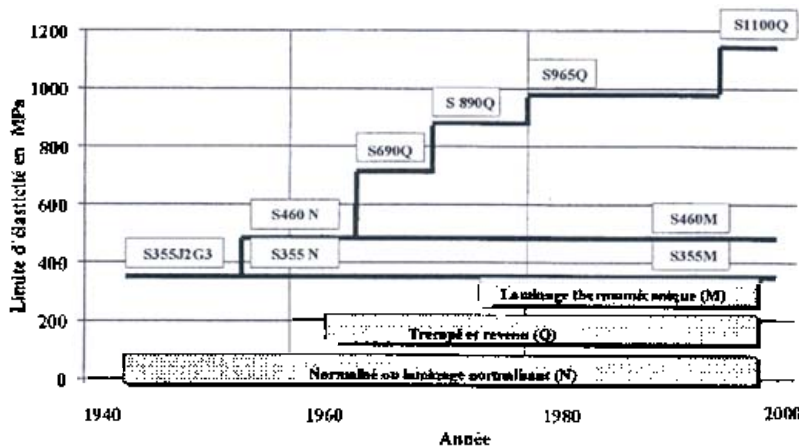
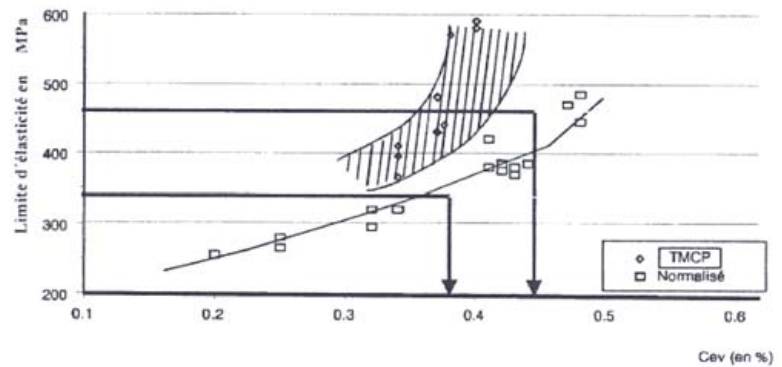


Fig. 1 – Développement des nuances pour la construction métallique.

Fig. 1 – Development of steel grades for structural applications.

Fig. 2 – Réduction du carbone équivalent par l'utilisation d'aciers thermomécaniques.

Fig. 2 – Reduction of the carbon equivalent by using TM-rolled steel grades.



■ DIMENSIONS DE TÔLES FORTES POUR LES PONTS MÉTALLIQUES

Aujourd'hui, les sidérurgistes et en particulier Dillinger Hütte GTS sont capables de produire non seulement des produits plats classiques, mais aussi des plaques dont

l'épaisseur varie dans le sens de la longueur, encore appelées tôles profilées en long - TPL. Ces tôles profilées en long peuvent être fournies dans de nombreuses formes : la figure 3 représente les formes les plus simples comme un simple coin (type 1) ou des formes plus compliquées (types 6 à 9). Bien sûr, quelques restrictions s'appliquent, comme la différence maximale d'épaisseur ou la pente maximale.

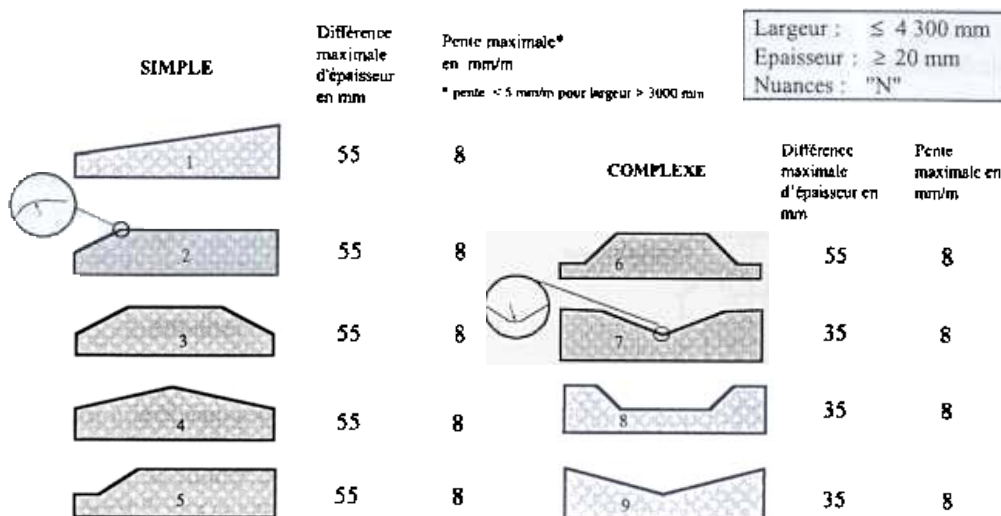


Fig. 3 – Les différents types de tôles à épaisseur variable.

Fig. 3 – Various shapes of longitudinally profiled plates.

TABLEAU 1 : Ponts européens construits avec des tôles profilées en long.

TABLE 1 : European bridge construction using longitudinally profiled plates.

Réalisations	Pays/Année	Tonnage	dont TPL	Nuances
Pont de Maas	F/1983	350	90	S355J2G3
Pont de Sauertal (A48)	D/1987	11 600	400	S355J2G3 mod.
Pont de Beekerwerth (A42)	D/1988	8 500	600	S355J2G3 mod.
Viaduc de la Somme	F/1990	2 600	1 047	S355K2G3
Viaduc de la Haute Colme	F/1991	5 200	1 270	S355K2G3
Pont de Porta Westph. (A2)	D/1993	2 085	880	S355J2G3 mod.
Pont de Wellingén	D/1995	800	290	S355J2G3 mod.
Viaduc de l'Arve	F/1996	3 400	1 400	S355N/NL
Viaduc de l'Orgon	F/1996	3 600	985	S355N/NL
Pont de Vockerode (A9)	D/1997	7 000	2 400	S355J2G3 mod.
Dintelhaven Spoorbrug	NL/1997	3 000	985	S355J2G3
Pont de River Clyst	UK/1997	100	75	S355J2G1 W
Viaduc de Altwies	L/1998	995	667	S355J2G3
Canal de Magdebourg	D/1999-2001	23 000	4 500	S355J2G3
Viaduc de Schengen	D-L/2000	3 900	1 800	S355N/NL

Comme indiqué dans le *tableau 1*, ces produits ont été acceptés par la plupart des concepteurs de ponts. Ces quelques exemples illustrent l'usage des tôles PL en Europe. Les tôles PL ont déjà été utilisées en Allemagne, France, Grande-Bretagne, Luxembourg et Hollande, et il y a des projets dans lesquels les tôles PL représentent à peu près la moitié du total de l'acier utilisé tel le pont sur la Moselle près de Schengen.

■ EXEMPLES D'UTILISATION DES TÔLES FORTES DANS LES PONTS

On distingue trois types de ponts selon la longueur de la portée : les ponts de petite portée, les ponts de moyenne portée et les ponts de grande portée.

Ponts de petite portée

Les ponts de petite portée sont des ponts avec une portée jusqu'à 6 m (ou 10 m maximum), une largeur jusqu'à 3,5 m et un poids jusqu'à 20 t. Pour ce type de ponts, des tôles fortes avec des épaisseurs jusqu'à 250 mm, une largeur jusqu'à 3,5 m et une longueur de 6 m sont utilisées, en particulier en nuances normalisées.

Le principal avantage des tôles fortes dans ces ponts réside dans le fait qu'ils peuvent être construits en utilisant une seule tôle en longueur. Cette technique de tôle unitaire a été introduite par les Chemins de Fer Fédéraux Suisses qui l'ont utilisée pour un grand nombre de ponts de la ligne Lausanne-Genève. La *figure 4* montre un premier exemple : une tôle forte – une tôle profilée en long – repose sur des appuis en béton préfabriqué. Les principaux avantages sont :

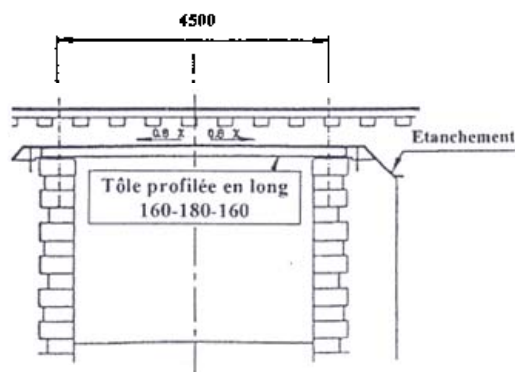


Fig. 4 – Exemple d'un pont de petite portée le pont de Moyaz (Suisse).

Fig. 4 – Example for a small span bridge : La Moyaz (Switzerland).

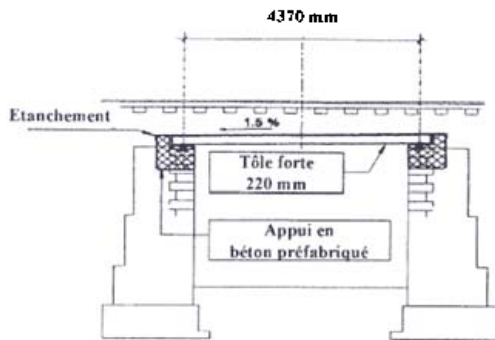


Fig. 5 – Exemple d'un pont de petite portée : le pont du Creux du Maz (Suisse).

Fig. 5 – Example for a small span bridge : Creux du Maz (Switzerland).

Du fait de l'utilisation d'une tôle profilée en long, il y a un avantage supplémentaire : l'évacuation naturelle de l'eau stagnant sur le pont.

Autre exemple de pont de petite portée : un pont près de Creux du Maz en Suisse, avec utilisation d'une tôle forte d'épaisseur 220 mm (fig. 5).

Ponts de moyenne portée

- 1) le temps de montage court : généralement moins de 8 h pour une voie ;
- 2) les excellentes propriétés de fatigue en raison de la suppression totale des joints soudés – ce point est particulièrement important pour un pont ferroviaire.

Le premier exemple est le pont Zuid Beveland en Hollande (fig. 6), un pont routier en acier avec des portées de 50 et 125 m. Pour la construction des deux poutres, il a été utilisé

Pont :	Pont routier en acier	Tôles fortes :	S355A1 (8 - 50 mm)
	Longueur: 175 m (125 - 50 m)		S460ML (12 - 80 mm)
	Bipoutre (HLE). Tablier en acier		1200 t

Fig. 6 – Exemple d'un pont de moyenne portée : le pont de Zuid Beveland (Pays-Bas).

Fig. 6 – Example for a medium span bridge : Zuid Beveland (The Netherlands).

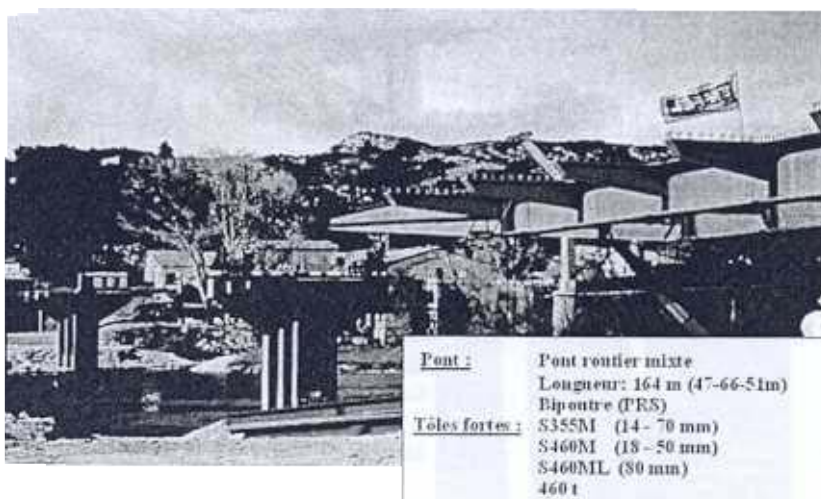


Fig. 7 – Le pont mixte de Remoulins (France).

Fig. 7 – Composite bridge near Remoulins (France).

Pont :	Pont routier mixte
	Longueur: 164 m (47-66-51m)
	Bipoutre (PRS)
Tôles fortes :	S355M (14 - 70 mm)
	S460M (18 - 50 mm)
	S460ML (80 mm)
	460 t

du S355M en épaisseur jusqu'à 50 mm et du S460ML en épaisseur jusqu'à 80 mm. La raison principale de l'utilisation d'un acier à haute limite d'élasticité était la hauteur de poutre la plus faible possible permettant ainsi d'assurer une hauteur maximale de tirant d'air.

L'exemple suivant montre le pont de Remoulins en France (fig. 7), un pont mixte composé de deux poutres longitudinales en acier et d'un tablier en béton de longueur totale de 164 m.

Pour cet ouvrage ont été utilisées des tôles fortes de nuance S355M en épaisseur jusqu'à 70 mm, S460M en épaisseur jusqu'à 50 mm et S460ML en épaisseur jusqu'à 80 mm pour un poids total de 460 t.

La figure 8 représente en coupe le pont au-dessus de la Nesebachtal dans la ville allemande de Stuttgart.

Ce pont, terminé en 1998, était un des premiers projets d'ouvrage dans lequel la nuance S690Q a été utilisée, en épaisseur jusqu'à 50 mm. Seule l'utilisation de ce matériau

a permis d'atteindre le haut niveau esthétique demandé, avec en particulier la poutre caisson qui a pu être réalisée avec une hauteur constante.

Le pont autoroutier de Wellingen sur l'autoroute A8 (en Allemagne) qui permettra de relier le sud-est de l'Allemagne au Luxembourg est un pont mixte de longueur totale 320 m (fig. 9). La construction des poutres en caisson ouvert a nécessité 800 t de S355J2G3, dont 290 t de tôles profilées en long.

Les tôles profilées en long ont été utilisées pour les semelles supérieures et inférieures des poutres. Ces tôles en coin procurent une adaptation optimale de l'épaisseur des semelles aux moments fléchissants avec, en plus, suppression de soudures. Ainsi, non seulement les coûts de matière ont pu être réduits, mais également le coût de la fabrication a pu être diminué.

Un exemple impressionnant : le pont-canal près de la ville de Magdebourg (fig. 10), qui est l'un des ponts les plus lourds du monde.

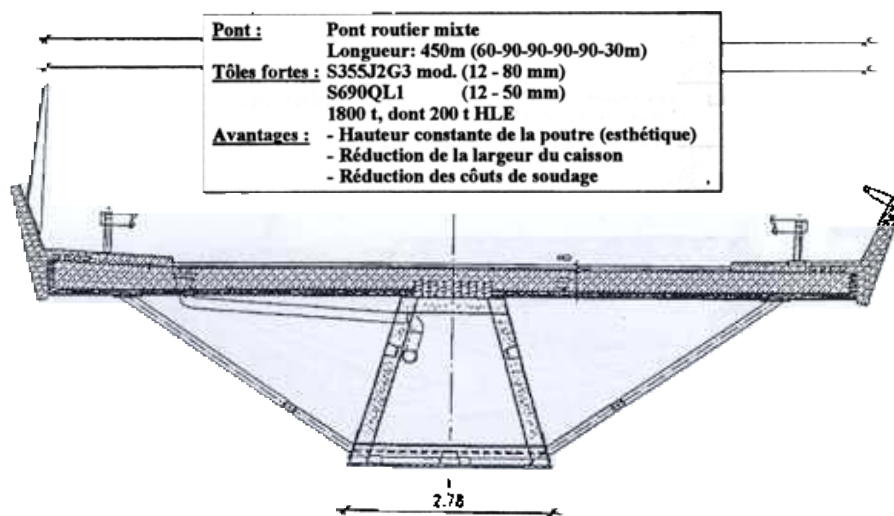


Fig. 8 – Exemple d'un pont de moyenne portée : le pont de Nesebachtal (Allemagne).

Fig. 8 – Example for a medium span bridge : Nesebachtal (Germany).

Fig. 9 – Exemple d'un pont de moyenne portée : le pont de Wellingen (Allemagne).

Fig. 9 – Example for a medium span bridge : Wellingen (Germany).

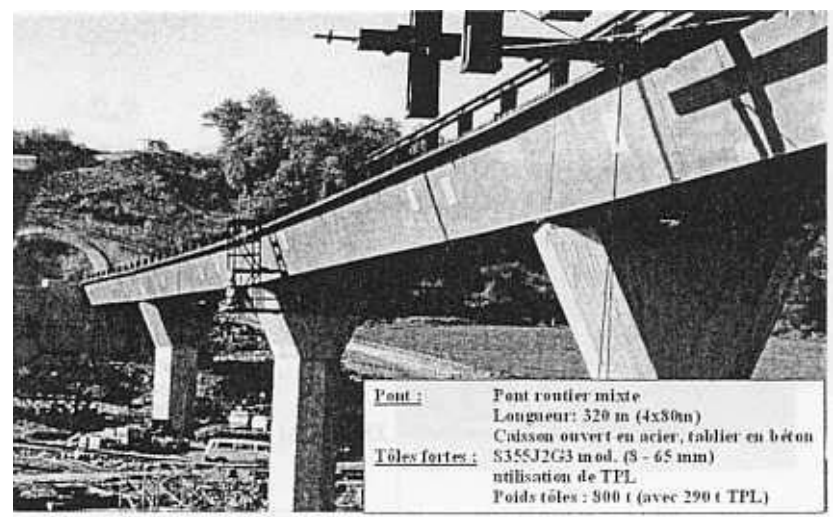


Fig. 10 – Pont-canal à moyenne portée près de Magdebourg (Allemagne).

Fig. 10 – Medium span canal bridge near Magdeburg (Germany).

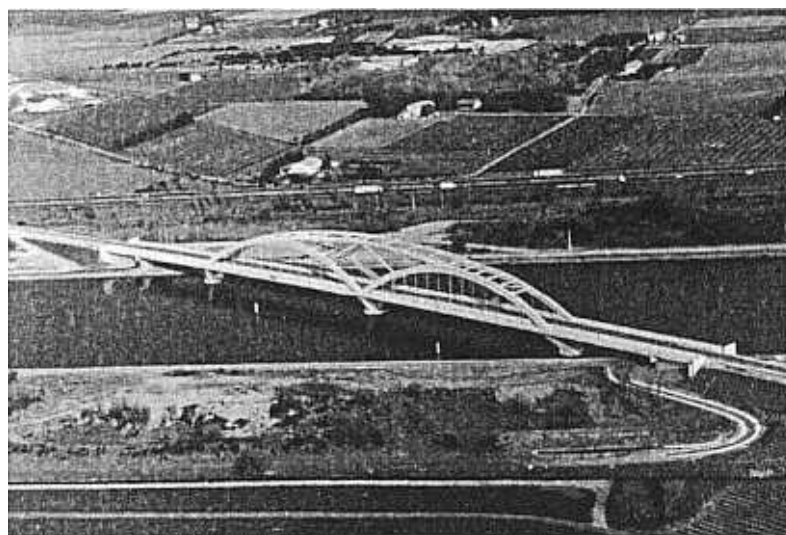
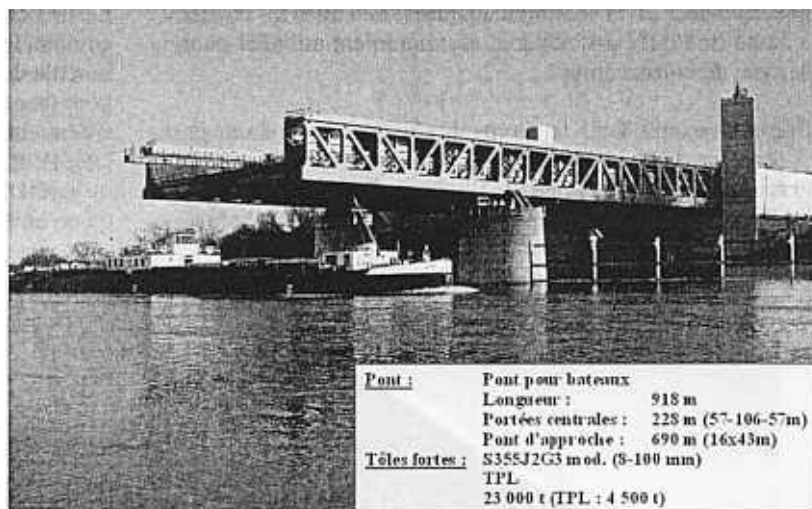


Fig. 11 – TGV Méditerranée: le viaduc sur le canal de Donzère (France).

Fig. 11 – TGV Méditerranée: bridge across the Donzère canal (France).

Ici, 23 000 t de tôles fortes en ont permis la construction dont environ 4 500 t de tôles profilées en long.

Finalement, deux exemples de construction de pont très esthétiques sur la ligne du train à grande vitesse dans le sud de la France. Les deux sont appelés « pont bow-string ».

Il s'agit du pont sur le canal de Donzère (fig. 11) et du pont de Mornas (fig. 12).

Ponts de grande portée

Les ponts de grande portée (plus de 100 m) ont une largeur jusqu'à 50 m et un poids total de 5 000 à 80 000 t. Ce type de pont est exclusivement le domaine de la construction métallique. Des tôles d'épaisseur jusqu'à 180 mm, de largeur jusqu'à 4,3 m et de lon-

Fig. 12 – TGV Méditerranée : le « bow-string » de Mornas (France).

Fig. 12 – TGV Méditerranée : Mornas bridge (France).



gueur jusqu'à 21 m sont bien adaptées. Les nuances d'acier à haute limite d'élasticité sont régulièrement utilisées pour ce type de construction.

Premier exemple : le pont de la Nantenbachtal en Allemagne (fig. 13), un pont pour trains à grande vitesse avec une portée centrale de 208 m. Pour cet ouvrage, 5 600 t d'une nuance S355J2G3 modifiée ont été utilisées.

Le très célèbre pont Erasme à Rotterdam (fig. 14) est une combinaison d'un pont à haubans de 410 m et d'un pont à bascule de 90 m. Le haut niveau esthétique demandé pour ce pont (par exemple la forme gracieuse du pylône) ne pouvait être atteint qu'avec l'utilisation d'acier à haute limite d'élasticité. Pour ce projet, le S355M a été utilisé en épaisseur jusqu'à 100 mm, le S460ML en épaisseur jusqu'à 80 mm ainsi qu'un S690QL modifié en épaisseur jusqu'à 120 mm.

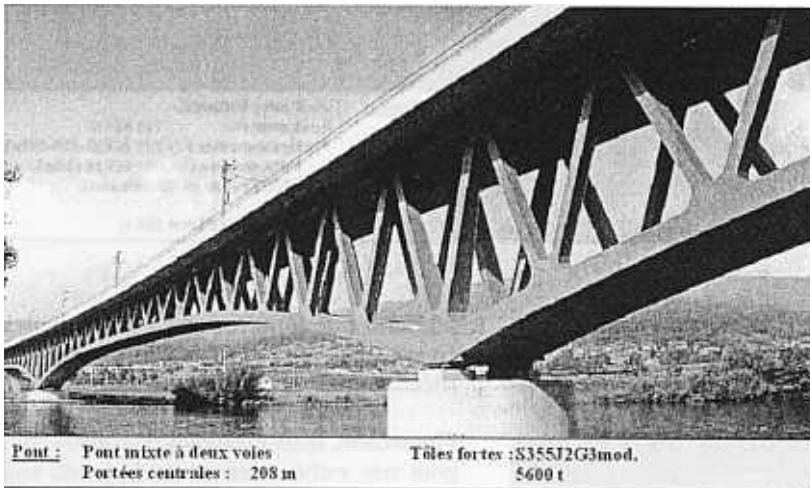


Fig. 13 – Le pont ferroviaire de Nantenbachtal (Allemagne)

Fig. 13 – The railroad bridge of Nantenbachtal (Germany).

Fig. 14 – Le pont Erasme, Rotterdam (Pays-Bas).

Fig. 14 – Erasmus Bridge, Rotterdam (The Netherlands).

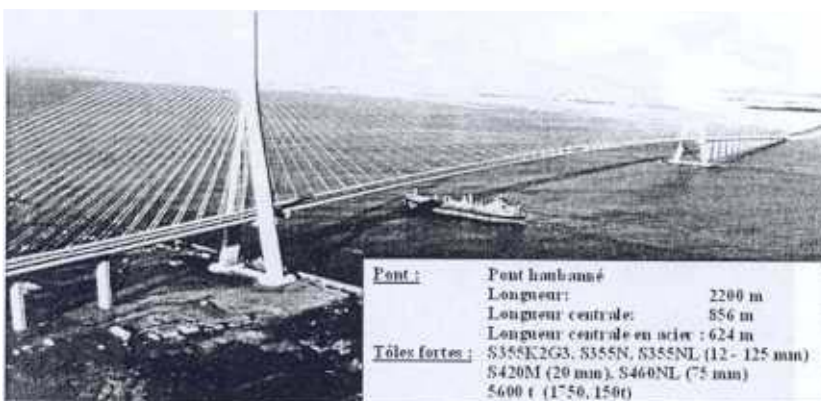


Fig. 15 – Le pont de Normandie (France).

Fig. 15 – Normandy Bridge (France).

Le viaduc d'Øresund relie la capitale danoise Copenhague avec la ville suédoise de Malmö. Ce lien est en service depuis l'été 2000. Pour le pont d'approche, la structure composite consiste en un tablier inférieur métallique pour la voie ferrée et un tablier supérieur en béton pour le trafic routier. Des tôles thermomécaniques en épaisseur jusqu'à 80 mm ont été requises. La principale raison de l'utilisation de cette nuance d'acier était la nécessité de réduire le poids de la structure pour minimiser le nombre de piles. Avec la réduction du nombre de piles dans le passage entre la Mer Baltique et la Mer du Nord, la perturbation des courants marins a été minimisée, un point écologique très important.

Le pont de Normandie (fig. 15) est un pont autoroutier à haubans sur l'estuaire de la Seine avec une portée centrale de 856 m. Pour ce pont, les nuances utilisées étaient les S420M et S460NL avec des épaisseurs jusqu'à 75 mm.

■ CONCLUSIONS

Pour les concepteurs de ponts, une large gamme de dimensions et de nuances d'acier est disponible aujourd'hui : épaisseur jusqu'à 250 mm et parfois plus, largeur jusqu'à 4,5 m et longueur jusqu'à 36 m pour un poids maximal unitaire de 60 t. Ces tôles fortes peuvent être produites dans de nombreuses nuances : aciers de construction classiques, nuances résistant à la corrosion (aciers autopatinables), aciers normalisés (ou avec laminage normalisant), aciers thermomécaniques ainsi que des nuances trempées et revenues.

Que réserve le futur ? Les aciers modernes doivent contribuer au processus de réduction des coûts de fabrication (pour lesquels la soudabilité est très importante). De plus, les concepteurs demandent une bonne homogénéité des produits. La planéité du produit deviendra de plus en plus importante et les sidérurgistes seront confrontés en outre à des tolérances d'épaisseur très étroites. Tout ceci constitue le défi que la sidérurgie moderne se doit de relever.

Falko SCHRÖTER, 31 ans, a fait ses études en science des matériaux aux Universités de Sarrebruck et Berlin. De 1995 à 1999 il a travaillé pour l'Institut de Mécanique Appliquée de l'Université de la Sarre et a passé son doctorat avec une thèse sur la mécanique des milieux continus anélastiques. Depuis 2000, il travaille pour Dillinger Hütte GTS et gère le marketing de la construction métallique.

Gilles GARRIGUES, 53 ans, Ingénieur Civil des Mines de Nancy et Master of Science. Entré en 1970 à Usinor, il occupe plusieurs fonctions en informatique puis en métallurgie à Usinor Longwy. De 1979 à 1982, il est le métallurgiste résident d'Usinor aux USA et vice-président de la filiale Toledo Pickling. Depuis 1982, il a occupé diverses fonctions à Usinor Dunkerque, puis à la tôlerie forte (actuellement GTS Industries, filiale de Dillinger Hütte). Il est actuellement responsable adjoint du Marketing de Dillinger Hütte GTS.

Jacques FLAHAUT, 51 ans, entré en 1972 à Usinor Dunkerque au Département Approvisionnement. De 1984 à 1990, il occupe à la tôlerie forte des fonctions techniques concernant les tôles à tubes. Depuis plusieurs années, il est responsable adjoint, pour le marché de la construction métallique, au sein du Département Marketing de Dillinger Hütte GTS.

Ralf HUBO, 43 ans, a fait ses études à l'Université d'Aix-la-Chapelle. Il est ingénieur de mécanique et de métallurgie et ingénieur de soudage. En 1990, il a passé son doctorat en métallurgie et est entré à Dillinger Hütte GTS comme responsable Marketing dans les domaines de la construction métallique et du négoce /oxycoupeurs. De 1994 à 1996, il a été chef du service Marketing à l'usine de Dillinger et, depuis 1996, il exerce la même fonction au sein de l'ensemble Dillinger Hütte GTS.